

# 短焦距变焦物镜设计

程 珂 周泗忠 张恒金

(中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

**摘 要** 介绍了机械补偿式三组元连续变焦系统设计方法; 基于微分解析法, 提出快速变焦法用于优化系统高斯初始结构, 减小了外形尺寸. 并设计了一焦距 3.87 mm~19.35 mm, 视场 76.6°~17.71° 可见光变系统. 设计结果表明: 该变焦系统较之同类专利设计结果, 具有结构紧凑、视场大、像面稳定度高的优点.

**关键词** 光学设计; 变焦距; 光学系统

**中图分类号** TP73 **文献标识码** A

## 0 引言

短焦距变焦物镜在广角监控、数码摄像、医疗诊断、公安侦察等领域有广泛的应用, 但短焦距变焦系统设计的公开报道较少, 其特点是焦距短、视场大、结构要求紧凑, 大多采用机械补偿式, 高斯初始结构的选取尤为重要. 文献[1]提出曲线拟合法选取高斯结构, 但不能对结构做定性分析, 不能实现快速变焦; 文献[2]提出了微分解析法选取初始高斯参数, 可定性分析结构, 但没有给出快速变焦实现的条件及实现途径. 本文解决了以上问题, 并用于指导初始结构设计, 与同类专利相比, 系统的长度减小, 同时保证了相同相对孔径并扩大了视场, 满足了使用要求.

## 1 设计方法

快速变焦是指通过选取合适的变倍组、补偿组垂轴放大率  $\beta_i$ , 找到最短途径实现变焦. 机械补偿式连续变焦系统中, 变焦组元都满足方程

$$\sum \frac{1-\beta_i^2}{\beta_i^2} f'_i d\beta_i = 0 \quad (1)$$

选取适当  $f'_2, f'_3, \beta_{2l}$ , 再取一适当  $d_{23l}$ , 使变倍、补偿组元长焦时不会相碰, 得

$$\beta_{3l} = \frac{f'_3}{f'_2(1-\beta_2) - d_{23l} + f'_3} \quad (2)$$

式中  $f'_2, f'_3$  分别为变倍组、补偿组焦距;  $\beta_{2l}, \beta_{3l}$  分别为长焦时变倍组、补偿组垂轴放大率;  $d_{23l}$  为长焦时变倍组、补偿组之间距离.

令变倍组作线性移动, 移动量为  $\xi$ , 得  $\beta_2 = \frac{f'_2 \beta_{2l}}{f'_2 + \beta_{2l} \xi}$ .

由式(1)、(2)可得如下方程

$$f'_3 \left( \frac{1}{\beta_3} + \beta_3 - \frac{1}{\beta_{3l}} - \beta_{3l} \right) + f'_2 \left( \frac{1}{\beta_2} + \beta_2 - \frac{1}{\beta_{2l}} - \beta_{2l} \right) = 0 \quad (3)$$

整理可得

$$\beta_3^2 - b\beta_3 + 1 = 0 \quad (4)$$

式中  $b$  可以表示为

$$b = -\frac{f'_2}{f'_3} \left( \frac{1}{\beta_2} - \frac{1}{\beta_{2l}} + \beta_2 - \beta_{2l} \right) + \left( \frac{1}{\beta_{3l}} - \beta_{3l} \right) \quad (5)$$

求解式(5), 可得

$$\beta_3 = \frac{b \pm \sqrt{b^2 - 4}}{2} \quad (6)$$

对式(1)求微分  $\frac{d\beta_3}{d\beta_2}$ , 有

$$\frac{d\beta_3}{d\beta_2} = \frac{(1-\beta_2^2)f'_2\beta_3^2}{(1-\beta_3^2)f'_3\beta_2^2} \quad (7)$$

当  $\beta_2 = -1$  时(根 1 舍)  $\beta_3$  有最小值, 由式(7)知  $\beta_3$  有 2 根, 且满足  $\beta_{31} = \frac{1}{\beta_{32}}$ , 可知其轨迹为两对称曲线, 对称点的距离随着  $b$  的值而变化, 式(5)中, 当  $b = -2$  时  $\beta_3$  两根相等为  $-1$ . 图 1(a) 直线代表  $\beta_2$  变化轨迹, 曲线为  $\beta_3$  变化轨迹, 此时两曲线相切(图 1(b)), 曲线相切为实现快速变焦的必要条件. 当  $|b| > 2$  时  $\beta_3$  两根不相等, 此时两曲线无切点, 不能

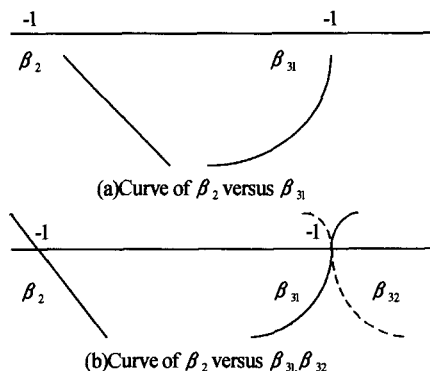


图 1 系统外形图  
Fig. 1 Zoom system configuration

实现换根,若在此情况下设计,  $\beta_3$  一般取  $\beta_{31} > -1$  段(图1(a)),不能取  $\beta_{31} < -1$  段,此段为最慢变焦.

快速变焦另外一个条件是:变倍组、补偿组同时实现物像交换,即  $\beta_{31l} = \frac{1}{\beta_{31s}}, \beta_{2l} = \frac{1}{\beta_{2s}}; \beta_{31l}, \beta_{31s}$  为补偿组长短焦垂轴放大率;在图1(b)中快速变焦途径为  $\beta_{31} > -1$  段及切点对称  $\beta_{32} < -1$  段(图中实线部分),若  $\beta_{31}$  曲线与  $\beta_{32}$  曲线对称于切点,此途径为快速变焦途径.

求出补偿组移动量为  $\delta = f'_3(\beta_3 - \beta_{3l})$ ,此时系统的总变焦比  $\tau = \frac{\beta_{2l}\beta_{3l}}{\beta_{2s}\beta_{3s}}$ ,当  $\tau$  达到要求时可停止搜索.

恰当利用以上规律可以设计出外形尺寸紧凑的系统,以下举例说明其应用.

## 2 实例分析

现设计一焦距  $3.87\text{ mm} \sim 19.35\text{ mm}$ ,视场  $76.6^\circ \sim 17.71^\circ$  大视场可见光变焦系统,要求结构尽可能紧凑.

### 2.1 求解最速变焦高斯结构

将  $f'_2$  取规划值  $-1$ ,取  $f'_3 = 1.4; \beta_{2l} = -1.1, \beta_3 = -1$  时  $b = -2$ ,带入式(5),得

$$\frac{-f'_2}{f'_3} \left( \frac{1}{\beta_2} - \frac{1}{\beta_{2l}} + \beta_2 - \beta_{2l} \right) + \left( \frac{1}{\beta_{3l}} - \beta_{3l} \right) = 2$$

解得:  $\beta_{31l} = -1.084, \beta_{31s} = -0.923$ ,带入式(3)求出  $d_{23l}$  为:  $d_{231l} = 0.592, d_{231s} = 0.817$ .

选择  $d_{23l}$  较长的那组解,长焦时变倍组补偿组不会相碰,此时  $\beta_{3l} = -0.923, d_{23l} = 0.817$ ,利用式(2)~(7)可得  $\tau = 5$  时,  $\xi = 1.4, \delta = 0.6$ .

取一组5倍变焦专利数据进行分析.将  $f'_2$  取规划值  $-1$  后得:  $f'_2 = -1; f'_3 = 1.49; d_{23l} = 0.98; \beta_{2l} = -0.63$ ,此处  $f'_3$  的选取对实现最速变焦很重要.

由上讨论知:最速变焦需变倍组、补偿组同时实现物象交换

$$\tau = \frac{\beta_{2l}\beta_{3l}}{\beta_{2s}\beta_{3s}} = (\beta_{2l}\beta_{3l})^2 = |\beta_{2l}|^2 |\beta_{3l}|^2$$

$|\beta_{2l}| = |\beta_{3l}|$  ( $|\beta_{2l}| > 1$ ) 时  $\tau$  有最大值,此时  $|\beta_{2l}| = |\beta_{3l}| = \tau^{1/4}$

根据  $|\beta_{2l}|, |\beta_{3l}|$  和物象交换原则,当  $f'_2 = -1$  时很容易求出  $f'_3 = \tau^{1/4} = 1.49$ .实际设计中  $|\beta_{2l}|$  与  $|\beta_{3l}|$  不相等,否则变倍组、补偿组之间距离太短,可根据具体情况对待.利用式(2)~(7)可得  $\tau = 5$  时,  $\xi_1 = 1.28; \delta_1 = 1.011$

图1(a)为专利曲线图,图1(b)为实例曲线图,图1(b)中当  $\beta_2 = \beta_3 = -1$  时,两曲线相切,此时平滑换跟,由曲线右上半部换到曲线左下半部,由于不对称只能实现快速变焦;图1(a)中  $\beta_2, \beta_3$  都取不到

$-1$ ,故无法换跟,所以实例结构比专利结构短.

### 2.2 校正像差

寻找到最速变焦结构后要重点校正大视场带来的像差.视场大使得垂轴像差(慧差、畸变、倍率色差)校正有一定困难,但是只要找到像差变化规律还是可以做到的.

变焦距像差的校正遵循“先分再合”的原则<sup>[3~8]</sup>,即先不考虑后固定组,将其他组元各自独立校正像差,保证变倍过程中各透镜组不会产生很大的像差变化;再将上述几个组元组合起来在变倍范围内等间隔取5个焦距位置,保持各组元光焦度不变的情况下改变各组元结构参数,使5个焦距的像差尽可能接近.最后再考虑后固定组,使其产生与前数量相同但符号相反的像差,对前几组进行像差补偿,但是前面的像差也不能留很多,因后固定组要校正很多的残留像差是很困难的,特别是像散和畸变.

$$S = \sum_{i=1}^n h_p P - J \sum_{i=1}^n W$$

$$S_3 = \sum_{i=1}^n \frac{h_p^2}{h} P - 2J \sum_{i=1}^n \frac{h_p}{h} W + J^2 \sum_{i=1}^n \frac{1}{h} \Delta \frac{u}{n} \quad (8)$$

$$P = n^2 (hc - u)^2 \Delta \frac{u}{n}$$

$$W = -n (hc - u) \Delta \frac{u}{n}$$

$$C_2 = \sum_{i=1}^n h h_p \frac{\varphi}{v} \quad (9)$$

长焦时前固定组轴上光线  $h$  最大,向短焦方向递减;长焦、短焦时前固定组  $h_p$  都是最大且变化不大,变倍组  $h_p$  在长焦往短焦方向移动时迅速增大,由式(8)知对垂轴像差贡献很大.移动时像差情况虽复杂,但只需校正好上述5点位置像差.由式(9)知,前固定组矫正短焦大视场引起的倍率色差贡献最大,因此可改变前固定组玻璃、光焦度分配来消倍率色差;前固定组相对孔径大决定其结构复杂,其光焦度分配应按光线走向依次递减分配;变倍组情况较复杂,相对孔径变化迅速,轴外像差也迅速增大,背向光阑面对其贡献很大.补偿组与后固定组相对孔径变化不大,结构相对简单些.

视场大亦带来设计过程中“飞边”现象,为避免这种现象带来的不便,可采用先以  $0.7\omega$  ( $76.6^\circ \sim 17.71^\circ$ ) 视场为全视场进行设计,后逐渐加厚玻璃厚度扩大视场.实践证明此方法有效.

## 3 设计结果

图2为该系统结构图,表1为变倍组,补偿组移动时与前后组元的距离,其中  $d_l$  为变倍组与前组元距离,  $d_{12}$  为变倍组与补偿组距离,  $d_{17}$  为补偿组前后

组元距离,  $f$ 、 $l'$  分别为此时焦距与后工作距离; 图 3 为凸轮曲线轨迹. 从解析法得到的凸轮轨迹来看, 曲线连续, 平缓, 完全符合机械加工要求. 从光学总长来看, 筒长比上述专利减少 5.1 mm, 结构更加紧凑. 从得到的后截距看, 满足像面稳定, 一倍焦深以内最大偏差  $4 \mu\text{m}$ , 因篇幅所限, 只给出了长焦、短焦等传函曲线图(图 4). 从设计结果看出, 成像质量好, 像质稳定, 满足使用要求.

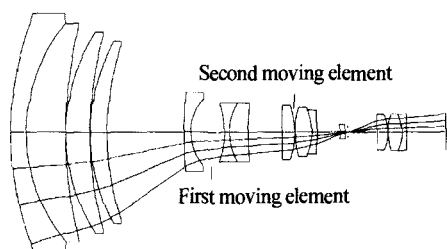


图 2 系统结构

Fig. 2 Schematic diagram of the zoom system

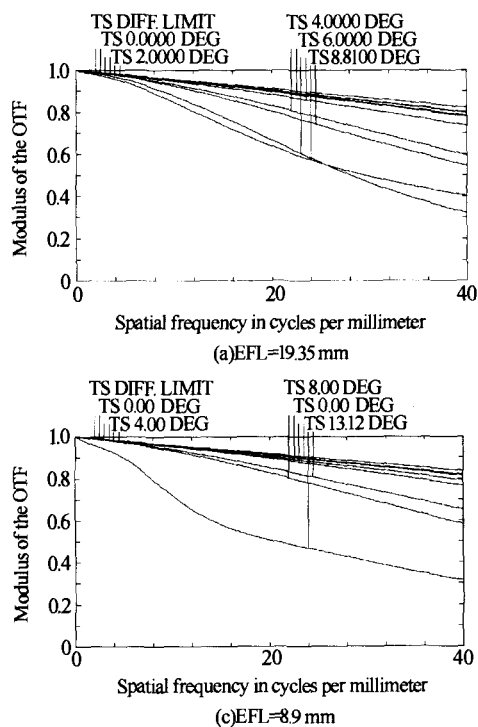


图 4 系统传函

Fig. 4 Visible projector design performance

## 4 结论

本文介绍了一种新的连续变焦设计方法, 由于视场大且要求结构紧凑, 故采用解析法寻找最优结构以满足要求. 设计过程中一方面寻找到快速变焦途径, 另一方面先将 0.7 视场作为全视场设计, 简化了设计过程. 像差校正中的残留畸变可用软件实现矫正<sup>[6,7]</sup>. 若将变焦组设计为曲线运动, 可更快实现变焦.

### 参考文献

1 Wei Minshi. Long Wave Infrared Zoom Projector thermal

表 1 间隔参数

$d_7$	14.35	12.27	10.23	9.56	4.86	2.61	0.90
$d_{12}$	1.50	5.41	8.37	9.23	15.18	17.80	19.76
$d_{17}$	5.48	3.65	2.72	2.50	1.30	0.92	0.67
$f$	19.35	12.89	9.669	8.932	5.410	4.446	3.872
$l'$	6.317	6.318	6.319	6.319	6.321	6.319	6.321

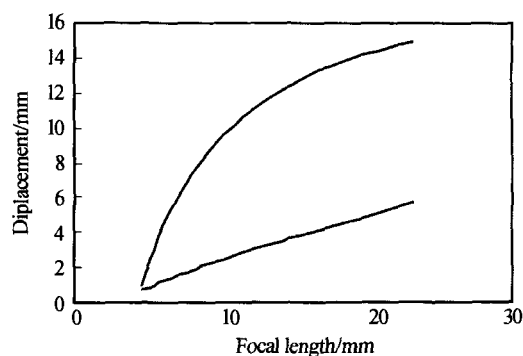
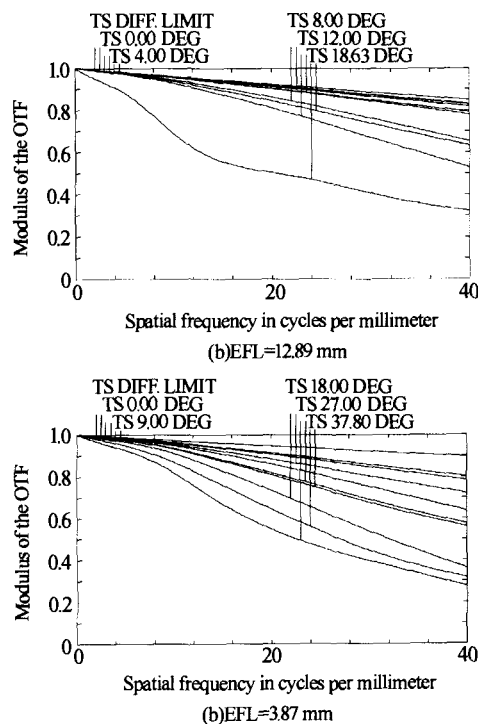


图 3 凸轮轨迹

Fig. 3 Lens group locations versus EFL



analysis and compensation. *Optical Engineering*, 2000, **39**(10):2705~2715

- 2 Tao Chunkan. Varifocal differential equation theory of zoom lens. *SPIE*, 1995, **2539**:168~179
- 3 陶纯堪. 变焦距光学系统设计. 北京: 国防工业出版社, 1988. 8~22  
Tao C K. Zoom Lens Design. Beijing: National Defence Industry Press, 1988. 8~22
- 4 胡炳梁, 曹剑中, 熊仁生, 等. 变焦距镜头组的自适应的调焦的实现. *光子学报*, 2003, **32**(8):1004~1006  
Hu B L, Cao J Z, Xiong R S, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(8):1004~1006

- 5 李林. 计算机辅助光学设计的理论与应用. 北京: 国防工业出版社, 2002. 174~175  
Li L. Theory and Application of Computer Aided Optical Design. Beijing: National Defence Industry Press, 2002. 174~175
- 6 王虎, 苗兴华, 惠彬, 等. 短焦距大视场光学系统的畸变矫正. 光子学报, 2001, **30**(11): 1409~1413  
Wang H, Miao X H, Hui B, *et al*, *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(11): 1409~1413
- 7 刘金根. 一种基于现场定标法的光电图像畸变矫正算法. 光子学报, 2004, **33**(6): 732~736  
Liu J G. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(6): 732~736
- 8 袁旭沧. 光学系统设计. 北京: 科学出版社, 1985. 201~203  
Yuan X C. Optical Design. Beijing: Science Press, 1985. 201~203

## Design of a Short Focal-length Zoom System

Cheng Ke, Zhou Sizhong, Zhang Hengjin

*Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics Chinese Academy of sciences, Xi'an 710068*

Received date: 2004-10-09

**Abstract** A method for initial zoom system design was proposed. The new optimized arithmetic was used for designing based on differential analytic expression method. The results showed that the length of the system could be reduced in this way. An example of three moving group elements and mechanic compensator type was given with configuration  $f' = 3.87 \sim 19.35$  mm,  $\omega = 76.6^\circ \sim 17.71^\circ$ .

**Keywords** Optical system design; Zoom system

**Cheng Ke** was born in 1980. He received B. S degree in Shuzhou University in 2002. Now he is working towards the master degree in Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics. His main research focuses on optical system design.